

## Supervisión y control en ingeniería de procesos agroalimentarios

P. Barreiro

Dpto. Ingeniería Rural. ETSI Agrónomos (Madrid)

y I.M. Navas

Dpto. de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid

### 1. ¿Qué es la ingeniería de procesos agroalimentarios?

Podemos definirla como el conjunto de medios, materiales y reglas de control que permiten conferir unas propiedades preestablecidas a un producto agrario o alimenticio. Difiere fundamentalmente de la ingeniería química en que las propiedades a obtener son varias (textura, sabor, color) y no una sola (pureza de un determinado producto químico). Por otra parte, los métodos instrumentales disponibles para cuantificar dichas propiedades no siempre existen o están suficientemente validados. Motivo por el cual puede ser necesario el empleo de expertos en su definición y evaluación.

### 2. Diferencias entre mecanización y control

Por mecanización entendemos la sustitución de la potencia humana o animal en el trabajo

por una potencia mecánica. El control automatizado, en cambio, viene a sustituir la toma de decisiones de las personas en el proceso.

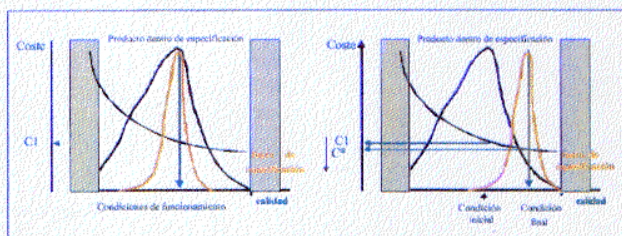
El desarrollo de la mecanización es cronológicamente anterior al control automatizado.

La mecanización ha permitido la industrialización del sector agroalimentario aumentando la productividad y disminuyendo las necesidades energéticas, mientras que los sistemas de control se centran en la consecución de unos niveles de calidad y salubridad en el producto final. En un primer momento el objetivo del control automatizado es reducir la variabilidad en la calidad del producto final (Fig. 1) para posteriormente poder optimizar el proceso (reducir los costes). Por tanto, la optimización es más la consecuencia del control que el objetivo buscado.

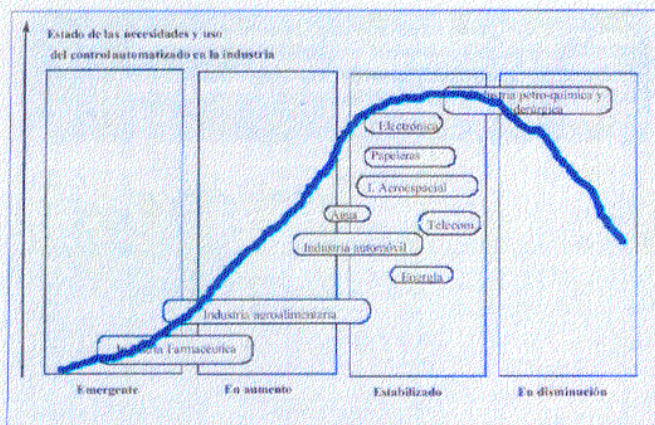
En un esquema sobre las necesidades y uso del control automatizado en la industria (Fig.

*Este artículo nace de la necesidad de resumir parte de los conceptos y aplicaciones descritos por D. Gilles Trystram director del Dpto. de Ingeniería Industrial Alimentaria de la ENSIA de París (Ecole Nationale Supérieure de Industries Agricoles et Alimentaires, Massy) dentro del curso titulado Automatización y Control en Industrias Agroalimentarias. Este curso se impartió en el Dpto. de Ingeniería Rural de la ETSI Agrónomos dentro del programa Doctorado de Calidad.*

Figura 1. Objetivos en el control automatizado. En primera instancia se pretende conseguir una mayor homogeneidad en la calidad (figura izda, transición de la gráfica negra a la roja) y conocer el coste de operación (C1) en dichas condiciones. En segunda fase (fig. dcha) se procede a mejorar la calidad media y reducir el coste de operación (de C1 a C2).







**Figura 2.** Necesidades y uso del control automatizado en la industria. Podemos establecer cuatro estados: emergente, en aumento, estabilizado y en disminución. La industria agroalimentaria corresponde a un nicho de mercado en que el control automatizado está en aumento.

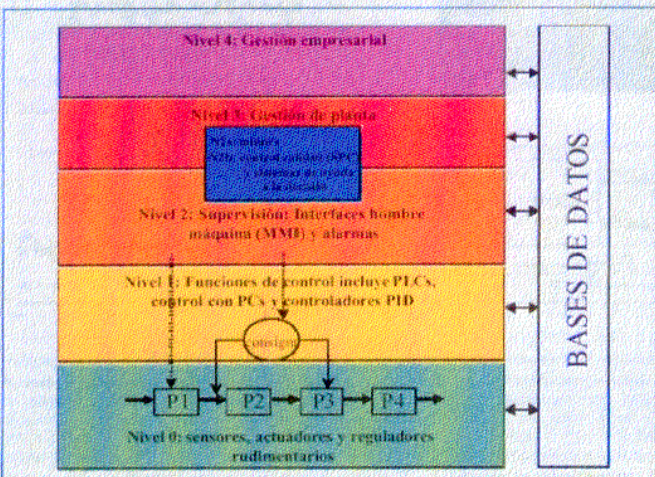
2) podemos establecer cuatro estados: emergente, en aumento, estabilizado y en disminución. Frente a sectores donde el control automatizado está estabilizado: electrónica, papeleras, tecnología aeroespacial, telecomunicaciones, depuración de agua, etc., la industria agroalimentaria corresponde a un nicho de mercado en que el control automatizado está en aumento. La disminución del control automatizado en determinados sectores (industria química y siderurgias) ha de entenderse en el ámbito de la flexibilización de procesos productivos con el fin de aumentar el número de productos elaborados en una misma planta. Aspecto que queda limitado cuando existe un

muy elevado nivel de control automático.

### 3. El control automático dentro de una gestión computerizada de la producción

La figura 3 muestra un esquema de los distintos niveles de información en sistemas de gestión computerizada de la producción (Computer Integrated Manufacture, CIM). Según este esquema hay cuatro niveles de información:

- Nivel 0: sensores, actuadores y reguladores rudimentarios.



**Figura 3.** Esquema de los distintos niveles de información en sistemas de gestión computerizada de la producción (Computer Integrated Manufacture, CIM).

- Nivel 1: funciones de control mediante controladores lógicos programables (PLCs), ordenadores o controladores PID (proporcional integral y derivativo), y determinación de los niveles de consigna (setpoints); tanto el nivel 0 como este son típicos de la industria química.

- Nivel 2: supervisión, típicamente realizada por operarios expertos. Incluye el diseño de interfaces hombre-máquina (Man Machine Interfaces, MMI) que son fundamentales a la hora de concentrar y representar la información proveniente de los niveles inferiores de manera que los operarios puedan modificar algunos parámetros de control. Los MMI son sobretodo fundamentales en la visualización de alarmas.

- Nivel 3: gestión de planta. Esta área está fundamentalmente relacionada con los laboratorios de control de calidad. En este nivel el perfil del personal encargado (gestión de la calidad) empieza a modificarse respecto a los niveles anteriores (ingenieros de control). Entre los niveles 2 y 3 se definen 2 sub-niveles: nivel 2 a: representación del proceso en pantalla (mimics) y nivel 2 b: funciones para la gestión de la calidad del producto. El control estadístico de procesos o SPC (Statistical Process Control) es una de las más conocidas. A este nivel corresponde también el desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión.

- Nivel 4: corresponde a la gestión empresarial e incluye aspectos de coordinación entre plantas de producción, gestión de clientes, estrategias comerciales y logística en general.

El término control automatizado de procesos incluye los niveles 0, 1 y 2, así como los sistemas de ayuda a la decisión.

En la figura 3 se observa que el nivel de supervisión, nivel 2, puede actuar directamente sobre el nivel 0 (sensores y actuadores), o sobre el nivel 1 variación de los niveles de consigna. El nivel 2 b correspondiente a la ges-



ción de la calidad del producto, realimenta el proceso por dos los mecanismos diferentes:

Los resultados de los sistemas SPC actúan sobre el nivel 1 - PLCs, ordenadores de control y/o controladores PID. Mientras que la evaluación de sistemas de ayuda a la decisión se efectúa por los expertos que actúan directamente sobre el nivel 0.

Los distintos niveles de información en procesos CIM han de volcarse en sucesivas bases de datos que deben estar cuidadosamente diseñadas. Estas bases de datos tendrán necesariamente distintas escalas de tiempo según el nivel del proceso. Así, la escala de tiempos de sensores y actuadores es del orden de segundos, horas en los laboratorios de calidad, y semanas en la gestión empresarial.

### 4. Tipos de procesos y sistemas de control asociados

Para poder establecer el sistema de control automatizado que más se adapte a un proceso (Tabla 1) podemos diferenciar entre: 1) flujos de producto continuos y discontinuos, y 2) naturaleza de la información lógica (0,1) y analógica (cuantitativa y continua).

Las operaciones secuenciales son procesos discontinuos que operan típicamente con información lógica. En estos casos se emplean modelos gráficos de representación (*Sequential Function Charts*) y tienen como propiedad fundamental que pueden ser directamente transferidos a un PLC. Un ejemplo es el mezclado de componentes en una formulación alimenticia de manera que cada ingrediente se añada progresivamente.

En flujos continuos de producto donde se dispone de información cuantitativa proveniente de distintos sensores, la industria agroalimentaria em-

**Tabla 1. Tipos de procesos y sistemas de control asociados. Podemos diferenciar entre flujos de producto continuos y discontinuos, y naturaleza de la información lógica (0,1) y analógica (cuantitativa y continua)**

| Tipo de información | FLUJO DE PRODUCTO  |   |
|---------------------|--|---|
|                     | Discontinuo  | Continuo  |
| Lógica              | Operación secuencial<br>mezcla<br>clasificación<br>envasado          | 1   |
| Analógica           | Operación por lotes<br>enfriado<br>fermentación<br>secado<br>cocción | 3   |
|                     |  | Operación continua<br>intercambio calor<br>deshidratación<br>hornos en línea<br>evaporación |
|                     |  | 2   |

plea mayoritariamente controladores del tipo PID para mantener unos niveles de consigna (*setpoints*) preestablecidos.

En control clásico se asume la existencia un estado estacionario en este tipo de procesos, es decir, las perturbaciones provenientes del medio y del producto son de escasa consideración.

La figura 4 muestra un ejemplo de utilización de controladores tipo PID en el control automatizado de un secador de tambor para la deshidratación de cebolla. Concretamente en esta aplicación se emplean dos controladores PID que actúan de acuerdo con las señales recogidas por tres sensores de temperatura colocados respectivamen-

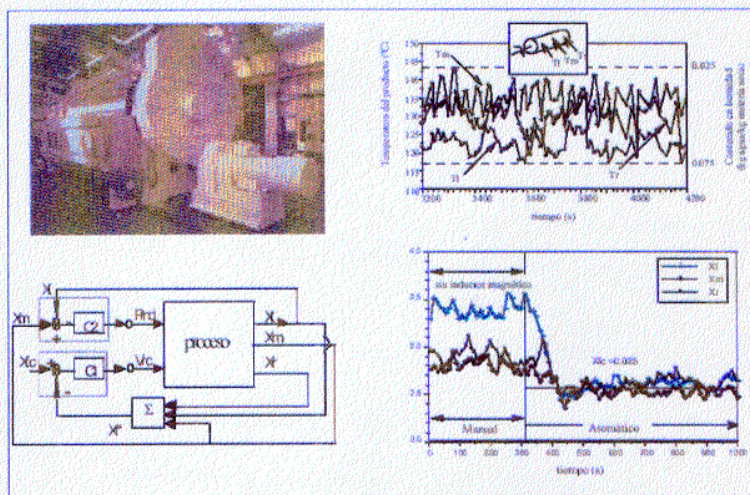


Figura 4. Ejemplo del uso de controladores PID en la supervisión de un secador de tambor (drum dryer). La supervisión de temperaturas muestra diferencias a lo largo del tambor sobretodo en el extremo de salida (fondo,  $T_n$ ). Se decide evaluar el contenido en humedad del producto ( $X$ ) en 3 puntos del tambor (fondo  $X_n$ , centro  $X_c$  y boca  $X_m$ ). Mediante un controlador PID ( $C$ ) que integra la información de los tres sensores ( $X_n$ ,  $X_c$  y  $X_m$ ) se modifica la presión del vapor de entrada ( $V$ ) en el tambor para alcanzar un nivel de humedad consigna elegida por el usuario. Otro controlador PID ( $M$ ) modifica la potencia de accionamiento de inductor magnético que calienta el extremo (fondo,  $P_m$ ) empleando como consigna alcanzar el nivel de humedad en la zona central del tambor ( $X_c$ ).



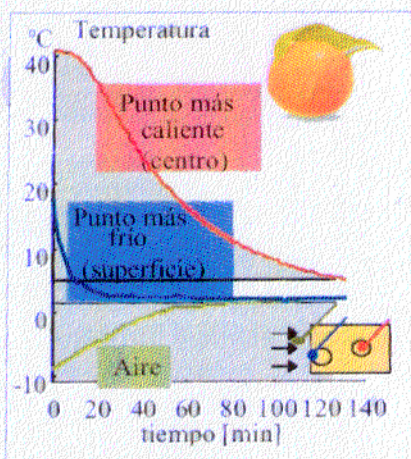


Figura 5. Ejemplo de proceso discontinuo. Prealimentación de lotes. Se trata de un proceso transitorio ya que al alcanzar la temperatura deseada (estado estacionario) se da por terminado el proceso.

te en la zona izquierda, central y derecha del tambor.

En procesos con procesamiento por lotes (*batch processes*) nos encontramos con un funcionamiento discontinuo que necesariamente deriva en un estado transitorio del sistema. Un ejemplo tipo es la determinación del momento de limpieza de un sistema de microfiltrado, el pre-entratado de un producto hasta alcanzar una determinada temperatura (Fig. 5), o la determinación del instante de renovación de un bio reactor. En estos casos el control automático se enfrenta a la selección de la trayectoria óptima en la dinámica del sistema de manera que respectivamente se maximice el periodo entre limpiezas del sistema de microfiltrado, se eviten temperaturas bajo cero en la superficie del producto (daños de escaldado), o se favorezcan las condiciones de crecimiento de los microorganismos del bioreactor. Este tipo de procesos es el más difícil de automatizar en su control. En ellos se puede recurrir a sistemas de control avanzado aunque hoy en día industrialmente son mayoritariamente supervisados por operarios expertos encargados de tomar las decisiones en función de la evolución del proceso.

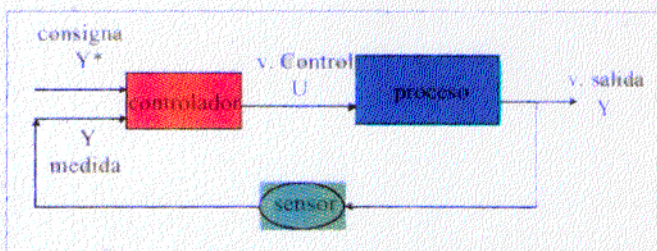


Figura 6. Esquema genérico de una estrategia de control en retroalimentación. La variable de salida medida con un sensor puede ser bien una variable de estado o una variable objetivo. En procesos agroalimentarios las variables objetivo muchas veces son difíciles de medir en tiempo real (textura, sabor).

## 5. Estrategias de control en un proceso automatizado

Las estrategias de control van más allá del tipo específico de controlador a emplear. Tienen que ver con la selección del parámetro a supervisar, el parámetro a controlar y el punto de colocación del controlador en el proceso. Podemos distinguir distintos tipos de parámetros en un proceso:

**Variables de entrada al sistema:** en ellas hay que distinguir entre las variables de control que son aquellas para las que disponemos de un actuador capaz de modificar con precisión su valor de forma continua, y las variables que caracterizan las perturbaciones (fuentes de variación no controladas por ejemplo condiciones iniciales del producto). Como criterio general no es conveniente elegir el flujo de producto como variable de control porque esto hace poco predecible la productividad de la planta.

**Variables de salida al sistema:** en ellas podemos distinguir entre las variables de estado y variables objetivo. Las variables de estado son aquellas que reflejan las consecuencias del funcionamiento del sistema (típicamente temperatura, presión, humedad relativa etc.), mientras que las variables objetivo determinan aquellos aspectos cualitativos que se desea conseguir con el control automatizado. Las variables objetivo en procesos agroalimentarios en muchos casos son difíciles de medir: textura, sabor, etc.

Una vez establecidos estos conceptos, podemos resumir de la siguiente forma las estrategias de control más comúnmente empleadas:

**Bucle abierto (*open loop*):** no existe controlador en el sistema. La mejora del funcionamiento del proceso se consigue modificando manualmente las condiciones de operación para obtener un estado lo más estacionario posible; por ejemplo optimizar los flujos de producto para evitar atascos y fallos de alimentación.

**Retroalimentación (*feed-back*) sobre las variables de estado y bucle abierto sobre los objetivos:** se acude a esta solución cuando las variables objetivo son difíciles de cuantificar de forma automatizada en tiempo real con sensores comerciales. El esquema general de un control en *feed-back* se puede ver en la figura 6 y consiste en la colocación de un sensor en una variable de salida del proceso. La información aportada por este sensor es transmitida al controlador, quien compara con un valor consigna y decide actuar sobre el proceso en el instante siguiente.

**Retroalimentación (*feed-back*) sobre las variables objetivo:** en este caso disponemos de un sensor capaz de determinar directamente en tiempo real aquellos aspectos que han de conferir la calidad al producto y actuamos retroactivamente en el sistema cuando apreciamos cambios en los niveles esperados.

Compensación de las perturbaciones



baciones o prealimentación (*feed forward*); en este caso se procede a compensar las perturbaciones supervisándolas antes de su entrada al proceso. Esta estrategia, menos convencional que las estrategias 2 y 3, está especialmente indicada cuando la duración del proceso es muy elevada y por tanto el resultado de las perturbaciones tarda en detectarse antes de poder ser compensadas. También está indicada en casos de procesos en serie donde una perturbación se transmite magnificada a lo largo del mismo. Este es el caso del proceso de evaporación en las azucareras (Fig. 7) ya que en la elaboración del azúcar se emplean hasta 5 evaporadores en serie. La principal diferencia en una estrategia de prealimentación

respecto a otra de retroalimentación, es que es necesario emplear un mayor número de sensores encareciendo el proceso aunque en la actualidad éstos dispositivos hayan reducido mucho su precio. La gran ventaja es que simplifica mucho el tipo de controlador a emplear y mejora los resultados finales del proceso.

### 6. Conclusiones

El sistema de control a emplear depende del tipo de flujo de producto y de la clase de información registrada por los sensores disponibles.

Los procesos secuenciales, que son por definición discontinuos

(una operación detrás de otra), y emplean información lógica (abierto/cerrado) se adaptan especialmente al uso de controladores lógicos programables PLCs.

Los procesos continuos monitorizados con información analógica (cuantitativa) son típicamente supervisados en la industria con controladores tipo PID aunque existen técnicas de control avanzado que, según el caso, pueden ofrecer mejores resultados.

El procesado por lotes supervisado mediante sensores analógicos es el caso más difícil de controlar de forma automatizada ya que no existe estado estacionario en el sistema. A este tipo de procesado van dirigidas en muchos casos las técnicas de control avanzado.

Es importante indicar que hoy por hoy más del 80% de las industrias trabajan sobre la base de sistemas clásicos de control. Se prevén grandes avances en innovación en un futuro próximo. Es decir avances en transferencia real de los dispositivos de control avanzado a algunas industrias. Los objetivos fundamentales: mejorar la eficacia, y lo que es más importante, ayudar a mantener y mejorar el conocimiento de los operarios expertos sobre la dinámica de los procesos.

Hasta aquí una escueta revisión de los conceptos fundamentales en supervisión y control en procesos agroalimentarios. Queda pendiente para un segundo artículo la descripción de las técnicas de control clásico en relación con las técnicas denominadas sistemas de control avanzado.

### 7. Bibliografía

- [1] Trystram, G. y Courtois, F., "Automatique et industries alimentaires - quelques avancées, perspectives et limites", Industries Agricoles et Alimentaires, 115, 6, 21-32 (1998).
- [2] Courtois, F. y Trystram, G., "A review of process control in food industry", 10th World Congress of Food Science and Technology, Sydney (Australia) 3-8 October (1999).
- [3] Trystram, G. y Bellon, V., "Les capteurs en agriculture et industries alimentaires", Journée capteurs et IAA-Clb CRIN/Technopôle de Brest, Brest (France) 1er décembre (1999).

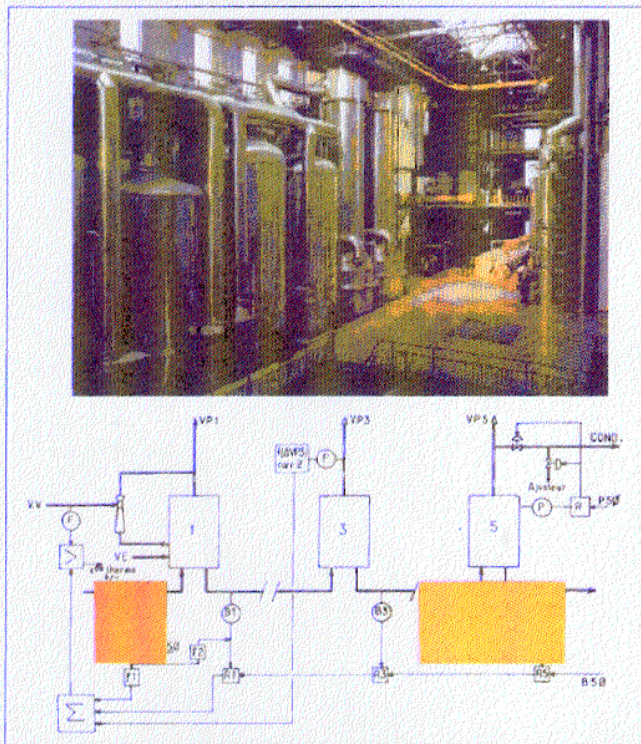


Figura 7. Proceso de evaporación en la fabricación del azúcar donde se emplean hasta 5 evaporadores en serie. En este esquema existen estrategias de pre y retroalimentación (en rojo y verde respectivamente). En el proceso de evaporación se pueden actuar sobre dos variables: el flujo del jugo clarificado (F) y la presión de vapor introducida (VP). Los sensores empleados ( $B_1$  a  $B_5$ ) son refractómetros que determinan el nivel de concentración de sólidos solubles en el jugo. En este esquema encontramos un bucle de pre-almatización a la entrada del primer evaporador (1) que modifica el flujo de entrada (F) en función de la medida de  $B_1$ . Véase también un bucle de retro-almatización en el quinto evaporador (5) que modifica el flujo de entrada de jugo clarificado (F) según la indicación de  $B_5$ . La combinación de la información de todos los refractómetros ( $B_1$  a  $B_5$ ) se emplea a su vez en retro-almatización para modificar la presión del vapor realimentado a través de la válvula (VV) desde el primer evaporador.